

A magyar földrengés-katalógusok felülvizsgálata a Mecsek-hegység környezetében kipattant szeizmikus események esetében

KISZELY MÁRTA, MÓNUS PÉTER, KALOCSAI LILLA, SÜLE BÁLINT, GYŐRI ERZSÉBET, TÓTH LÁSZLÓ

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, kiszely.marta@csfk.mta.hu, monus.peter@csfk.mta.hu, lillakalocsai@gmail.com, sule.balint@csfk.mta.hu, gyori.erzsebet@csfk.mta.hu, laszlo.toth@csfk.mta.hu

A szeizmológiai hálózat fejlődésének köszönhetően az utóbbi években egyre több szeizmikus eseményt regisztráltunk Magyarországon. Azonban ezeknek az eseményeknek nagy része az utóbbi években bányarobbanás volt. A katalógus felülvizsgálata, vagyis az, hogy elkülönítsük a természetes eredetű földrengéseket a robbantásoktól, fontos feladat lett. E célból megvizsgáltuk a Mecsek hegység környezetében bekövetkezett szeizmikus eseményeket. Kutatásunk célja az volt, hogy megtaláljuk a legmegfelelőbb módszert a földrengések és a bányarobbanások elkülönítésére, és felülvizsgáljuk a katalógus eseményeit. Felhasználtuk a bányakapitányok jelentéseit, valamint a szeizmogramok spektrális és hullámforma jellemzőit. Ezeket együtt figyelembe véve nagy hatékonysággal megtisztítható a katalógus a rosszul minősített eseményektől. Egy speciális térkép segítségével szemléltettük az eredményeinket. Az elemzéseink szerint a 2004-2016 közötti katalógusokban a földrengések 16%-a bizonyult robbantásnak.

M. KISZELY, P. MÓNUS, L. KALOCSAI, B. SÜLE, E. GYŐRI, L. TÓTH: Revision of the Hungarian earthquake catalogs for seismic events occurred in the vicinity of the Mecsek Hill

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Seismological Observatory, kiszely.marta@csfk.mta.hu, monus.peter@csfk.mta.hu, lillakalocsai@gmail.com, sule.balint@csfk.mta.hu, gyori.erzsebet@csfk.mta.hu, laszlo.toth@csfk.mta.hu

Due to the development of seismological network, increasing number of seismic events have been detected in the last years in Hungary. However, most of those shocks were quarry blasts. Therefore, the revision of the catalogue to discriminate natural seismicity from explosions has become an important task. For this purpose, we have studied the seismic events occurring in the surroundings of Mecsek Hills. The goal of our research was to find the best method to separate earthquakes and quarry blasts, and revising the classifications of events in the catalogues. We used the reports of mining captains and the spectral and waveform properties of seismograms. We can state that taking these into account the catalog can be cleaned from the misclassified events with great efficiency. We have demonstrated our results on a special map. According to our analysis, approximately 16% of events classified as earthquakes proved to be blasts between 2004 and 2016.

Bevezetés

A földrengések és robbantások elkülönítési módszereit elsősorban a nukleáris robbantások gyakorivá válása miatt, az atomcsend egyezmények betartásának ellenőrzésére fejlesztették ki. Mivel az atomrobbantások során a gerjesztett szeizmikus jeleket különböző módszerekkel csillapítják, ezért a megfigyelő hálózatoknak is egyre érzékenyebbé kellett válniuk, és a jelenlegi műszerek észlelési hatékonyságának már a háttérzaj – a tenger hullámzása, szél által keltett talajmozgás, ipari tevékenység és a városi közlekedés zaja – szintje szab határt. A korszerű nemzeti állomáshálózatok kiépülésével a bányarobbanások és földrengések szétválasztása is időszerűvé vált, ugyanis a tévesen kategorizált szeizmikus események meghamisítják a terület térbeli és időbeli szeizmitásáról alkotott képünket, téves szeizmotektonikai értelmezésekre juttatnak, valamint módosítják a terület földrengés-veszélyeztetettségi paramétereit.

A szakirodalomban számtalan dolgozat található a kisméretű bányarobbanások és földrengések elkülönítéséről. Ezek egy része a nappali és éjszakai események területi és

időbeli eloszlását és a különböző fázisok amplitúdó arányát elemzi (Gitterman et al. 1998; Kekovali et al. 2012; Yilmaz et al. 2013).

Wiemer és Baer bemutattak egy egyszerű módszert, amivel a katalógusok robbantásokkal való szennyezettsége kimutatható (Wiemer & Baer, 2000). A nappali (a robbantásos órák) és az éjszakai események számának arányát kiszámítva és térképen ábrázolva kijelölhetők a gyanús területek. A bányarobbantásokat mindig azonos helyen és hasonló időpontban végzik (epicentrumok a bányák közelébe esnek), a földrengések pedig különböző forrásokból erednek, és a nap bármely időpontjában kipattanhatnak. Európa területére Gulia (Gulia, 2010) tesztelte e módszerrel a katalógusok időbeli homogenitását. Vizsgálata több, robbantásokkal szennyezett területre hívta fel a figyelmet. Az időpont alapján történő elkülönítés azonban csak másodrendű lehet egyes események elemzése során – hiszen földrengés bármikor kipattanhat, – de hasznos lehet egy-egy régió elemzésekor.

Más módszerek a szeizmogramok spektrumainak alacsonyfrekvenciás teljesítményét hasonlítják össze a nagyfrekvenciás energiatartalommal (Wüster, 1993). Koch és Fäch Bohémia (Csehország) területén $1 < M_L < 2,5$ közötti események gránitos kéregben terjedő longitudinális és transzverzális azaz Pg- és Lg-(Sg)fázisait vizsgálta (Koch & Fäch, 2002). Elemzésük szerint a földrengések impulzívabb Lg(Sg)-hullámokat okoztak, mint a bányarobbantások. Azt tapasztalták, hogy magasabb frekvenciákon (7-9 Hz) a robbantások jobban elváltak a földrengésektől, mint a szélessávú hullámformákban. Azonban az elkülönítés sikere állomásról állomásra változott.

A bányarobbantásokat legtöbbször a késleltetett robbantási technika (ripple fired) alkalmazásával hajtják végre, mert így a kőzetek töredezettségét növelik, ugyanakkor a környezet megrázottságát csökkenthetik. Mivel a késleltetett egyedi robbantások szuperpozíciója adja ki a teljes robbantás jelét, ezért azonos késleltetési idők esetén az egyes robbantások keltette hullámok közötti konstruktív interferencia révén a teljes robbantási spektrumban bizonyos frekvenciákon megnő, másokon pedig lecsökken az energia. Ezek a frekvenciák egymástól egyenlő távolságra vannak, és a robbantás spektruma 'csipkézett' lesz. A spektrummoduláció matematikai hátterét Gitterman és Torild Van Eck tanulmánya ismerteti (Gitterman & Torild Van Eck, 1993).

Wüster Németország és Csehország határán (Vogthland) kipattant $1 < M_L < 3$ mikrorengések és kémiai robbantások elkülönítésére alkalmazta a P és S hullámok spektrumainak az elemzését (Wüster, 1993). Azt találta, hogy a földrengések esetében az S-hullám spektrum maximuma magasabb frekvenciákra terjedt ki, és az 1-10 Hz közötti tartományban a teljesítménye lassabban csökkent, mint a robbantásoké. Kim és társai kutatása szerint a robbantások domináns frekvenciái magasabbak (10 Hz felettiek), mint a földrengéseké. A P- és S-hullámok frekvencia tartalmát azonban módosítják a geológiai sajátosságok is, így területenként változhatnak a domináns frekvenciák. A robbantásokra jellemző, hogy nagyfrekvenciás összetevőik a távolsággal gyorsan elnyelődnek. (Kim et al., 1994).

Az általunk vizsgált terület az északi szélesség $45^{\circ}30'$ – $46^{\circ}30'$ és keleti hosszúság $17^{\circ}00'$ – $19^{\circ}00'$ között található, amely a Mecsek és Villányi-hegység környezetét és bányáit foglalja magában (1. ábra). A terület kiválasztását, szeizmotektonikájának pontosabb megismerését az indokolta, hogy az utóbbi években több bánya robbantásait is sikerült észlelni ezen a területen, és ezek elkülönítése a természetes eseményektől időszerűvé vált.

Elemzésünk szerint a bányarobbantások megfigyelt hullámformái éveken át nagyon hasonlóak maradtak. Sikerült a terület bányáira egy-egy szeizmogram mintagyűjteményt összeállítani, amelynek alapján több, korábban földrengésnek tartott vagy vélt eseményt utólag kiszűrtünk.

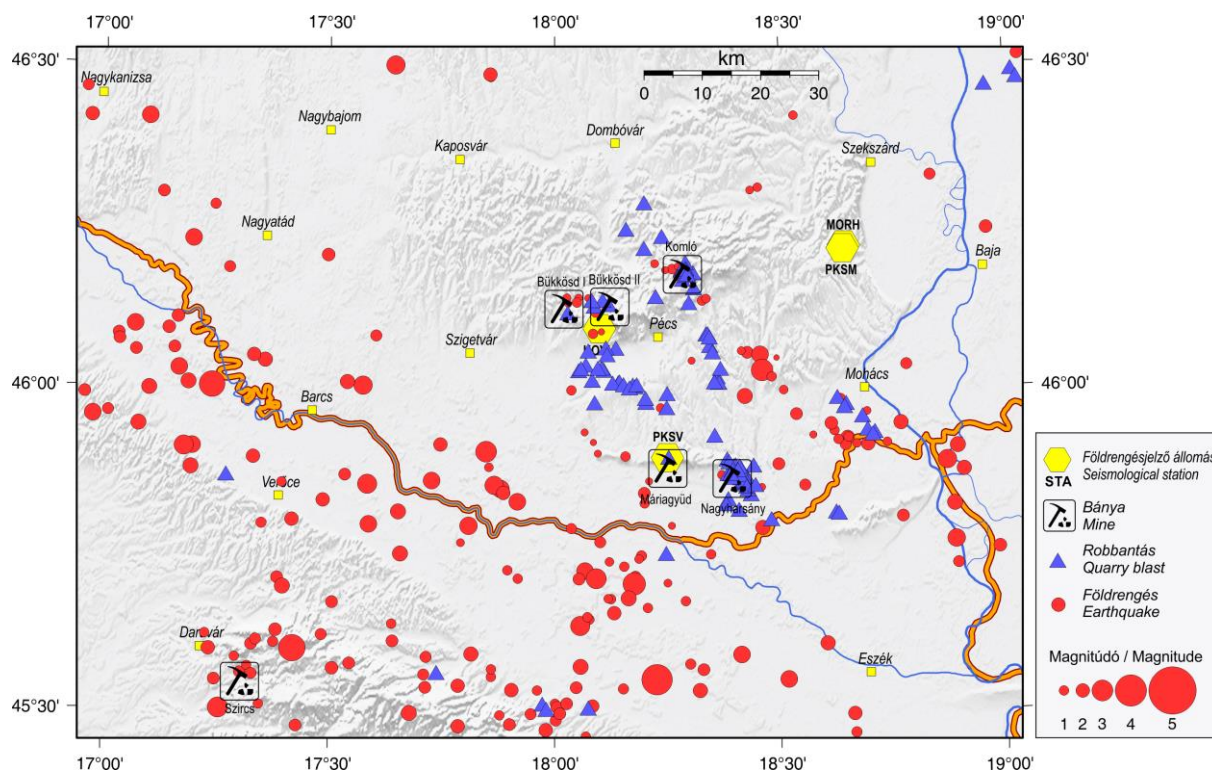
A terület bányáiban alkalmazott késleltetett robbantási technika során kialakult spektrális jelek segítségével pedig további földrengésnek tekintett robbantásokat sikerült a

katalógusokból kiszűrni. Vizsgálataink során a 2004 és 2016 közötti katalógusban a földrengésnek vett események kb. 16 %-a bizonyult robbantásnak.

Földrengés-katalógusok szennyezettsége robbantásokkal

A területen az első ismert földrengés 1528-ban Pécs városa közelében történt, azóta összesen 747 eseményt jegyeztek fel. Ebből 488-at az utóbbi 22 évben (1995 és 2016 között). A legnagyobb földrengés $M_L=5,5$ magnitúdójú volt, ami 1757. július 8-án pattant ki Verőce (Horvátország) térségében. A műszerek érzékenysége javulásával és a mérőállomások hálózata bővülésével a kisebb földrengések (és feltehetően már robbantások) regisztrálásával 1995-től a legtöbb regisztrált esemény magnitúdója már 1 és 1,5 közötti.

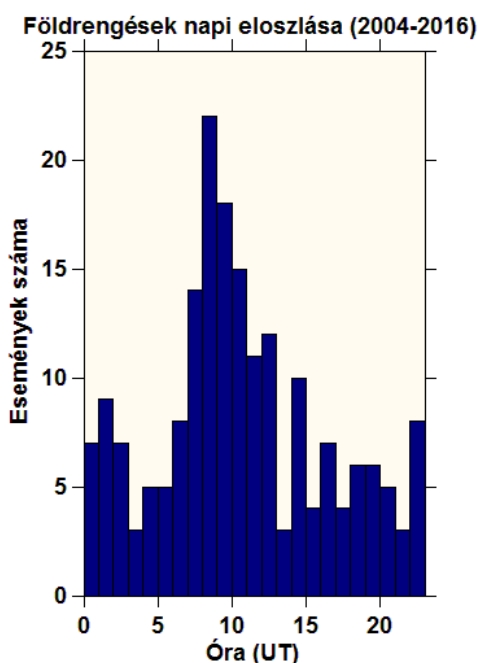
Az 1. ábrán látható a terület földrengéseinek és robbantásainak epicentrum térképe (az események újraosztályozása előtti állapot). Az elsődleges besorolás leginkább az esemény időpontja és a hullámformák alacsony frekvenciájú Rg fázisának megjelenése alapján történt. Az ábrán feltüntettük azokat a bányákat is, amelyek robbantásai megjelennek az állomások szeizmogramjain. Az epicentrumok helyének és a mélységeinek a hibája akár több km-es is lehet. Mivel a hibák olykor összevethetők a vizsgált terület bányáinak egymástól vett távolságával, ezért az epicentrum-koordináták és mélység adatok alapján, a területen nem lehet egyértelműen elkülöníteni a különböző forrású (bánya) eseményeket, térképre eső helyük inkább csak tájékoztató jellegű (1. ábra: háromszöggel jelölt események). A robbantásnak jelölt események a terület bányái körül 5-10 km-es távolságra is szétszóródtak, illetve a bányák közelében földrengések epicentrumai is láthatók.



1. ábra. A vizsgált terület szeizmicitása a bányák és az azonosított robbantások számított helyeivel (2004-2016)

Figure 1. Seismicity of the investigated region with the locations of mines and the computed locations of identified blasts (2004-2016)

Az osztályozás jóságát a természetes eredetűnek ítélt földrengések napi eloszlása alapján teszteltük (2. ábra). Robbantásokat a nappali – munkaidőn belüli – órákban végzik, míg földrengések a nap bármely szakaszában történhetnek. A 2. ábra alapján azonban a földrengéseknek jelölt események eloszlása maximumot mutat 7-12 (UTC) óra között, éppen a bányaművelés időszakában. Ennek alapján tehát valószínűsíthető, hogy a szeizmikus események osztályozása hibával terhelt, mivel a természetes eredetű földrengések időbeli eloszlása nem függ a napszaktól. Elkerülhetetlen tehát a szeizmikus események osztályozásának korrekciója.



2. ábra. A földrengésként azonosított események napi eloszlása revízió előtt
Figure 2. Diurnal distribution of events identified as 'earthquake' before revision

A terület szeizmikus mérőállomásai és az érintett bányák

A Mecsek környezetében a 2004 és 2016 közötti robbantások és földrengések szeizmikus jeleinek elemzését a területen található kővágótöttösi (KOVH), mórági (PKSM) és villányi (PKSV) szeizmikus állomások mérései alapján végeztük el. A mórági állomástól 300 m-re 2012-óta működik egy másik szeizmológiai állomás, a MORH is, amit a MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet üzemeltet, de ennek a regisztrátumait most nem használtuk fel. Az állomásokon háromkomponensű (3C), de egymástól különböző műszertípusok és érzékelők működnek: Kővágótöttösön jelenleg Streckeisen (STS-2) széles sávú (BB) szeizmométer, Mórágyn és Villányban pedig rövidperiódusú (SP) Güralp (CMG-40T) szeizmométerek működnek (1. táblázat).

A kővágótöttösi szeizmométer működésének kezdete 2015 márciusa. A PKSV állomás 2012.11.09 óta működik, pár hónapig (2013.04.23.) még Lennartz műszer detektált, majd azóta CMG-40T Güralp. A PKSM állomás működése 1997-ben indult, 2010-ig STS-2, 2011-2012 között Le-3D műszerrel, és 2013.04.10-től működik itt Güralp műszer.

1. táblázat. A vizsgálatokban felhasznált szeizmikus állomások paraméterei
Table 1. Parameters of seismic stations used in this study

Állomás	Helység	Szél.	Hossz.	Mag.	Alapkőzet	Típus	Érzékelő
---------	---------	-------	--------	------	-----------	-------	----------

kódja	(Szerv.)	(° É)	(° K)	(m)			
KOVH	Kővágótöttös GGI	46,088	18,099	270	Mészke	3C BB	STS-2
PKSM	Mórágó GR	46,212	18,643	135	Gránit	3C SP	CMG-40T
PKSV	Villány GR	45,888	18,252	420	Mészke	3C SP	CMG-40T

A vizsgált területen több működő kőbánya található. A magyarországi kőbányákban nagyfúrólyukas, ún. oszlopos sorozatrobantást (ripple-fired) alkalmaznak. Az általában négyzethálósan elhelyezett tölteteket soronként robbantják, a sorok töltetei között meghatározott 25-50 ms-os késleltetési időket alkalmazva. Területrobantást csak véletlenszerűen, egy-egy kisebb bányarész kialakításánál végeznek. A robbantólyukak átmérője 89 és 112 mm közötti, dőlésük 60° és 80°, hosszuk pedig 10 és 25 m között változik. Leggyakrabban alkalmazott robbanóanyagok az ANDO-prill (főtöltet) és az emulziós robbanóanyag (lábtöltet), az indítást DeM-S típusú villamos gyutacsokkal vagy a NONEL-rendszer elemeivel végzik (Bohus 2013). A Pécsi Bányakapitányságtól a 2015-ös és 2016-os évekre megkaptuk a terület 12 bányájának robbantási időpontjait, amik alapján arra jutottunk, hogy 5 bánya robbantásai érintik a katalógus eseményeit, a többi bánya robbantásait nem érzékelik az állomások. A Bükkösd I. és Bükkösd II.-mészkebánya közötti távolság csak fél km, de más-más cég az üzemeltetőjük. A 2. táblázatban ennek az 5 bányának az adatai láthatók.

2. táblázat. A térség bányáinak adatai
Table 2. The parameters of quarry in this region

Bánya neve	Szél. (° É)	Hossz. (° K)	Távolság az állomásoktól		
			KOVH	PKSM	PKSV
Bükkösd I. - mészke	46,120	18,023	6,8 km	49,3 km	31 km
Bükkösd II. - mészke	46,125	18,016	6,8 km	48,6 km	32 km
Komló II. - andezit	46,175	18,296	7,9 km	27 km	32 km
Nagyharsány I. - mészke	45,853	18,397	17,94 km	44,9 km	11,9 km
Máriagyűd I. - mészke	45,86	18,25	25,43 km	48,6 km	0,88 km

A hullámformák hasonlósága

Az általunk vizsgált területen a Magyar földrengés-katalógusok alapján 2004 és 2016 között összesen 310 szeizmikus eseményt ismerünk, ebből 194 eseményt jelöltek földrengésnek (63%). A vizsgált szeizmikus események epicentrum adatai az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézet és a GeoRisk Kft. által kiadott bulletinekből származtak (Tóth et al., 2005-2017, Grácz et al., 2012-2016).

A Mecsekben előfordult események felülvizsgálatát első lépésben a hullámformák hasonlóságának elemzésével végeztük. A Magyar Geofizika hasábjain (Kiszely & Győri, 2013; Kiszely et al., 2016) már foglalkoztunk a hullámforma-elemzés módszerével, és bemutattuk annak eredményeit az Északi-középhegység és Szlovákia déli részén levő bányák robbantásainak és a terület földrengéseinek elkülönítése esetében, ezért a módszer leírását itt már nem ismételjük meg.

A hullámforma-korrelációs elemzést az állomások horizontális csatornáinak 40 s hosszú 1-20 Hz közötti Butterworth sávszűrővel szűrt szeizmogramjain végeztük el. Mivel az

idők során többféle műszer működött egy-egy helyen – eltérő átviteli karakterisztikával – ezzel a szeizmogramoknak azt a frekvencia tartományát elemeztük, ahol az alkalmazott eszközök mindegyikében lineáris volt az átvitel.

Az S hullám nagyobb amplitúdóval jelentkezik a horizontális csatornákon, ezért jobban használhatók a szeizmogramok az analízise során. A hasonlóságot két x és y hullámforma között a c_{xy} korrelációs együtthatóval jellemezhetjük. Hasonlónak tekintettünk két eseményt, ha a korrelációs együttható értéke nagyobb, mint adódott egy határértéknél, amit esetünkben 0,5-0,55-nek vettünk, ami egy nem túl szigorú feltétel. A korrelációs együttható, mint „távolság” alapján a hullámformák rokonsági ágakba, csoportokba rendezhetők, ezt az egymásra épülő megjelenítést dendrogramnak nevezik. A csoportokba rendezett események száma és a csoportok összetétele változik a kritikus korrelációs együttható értékének változtatásával.

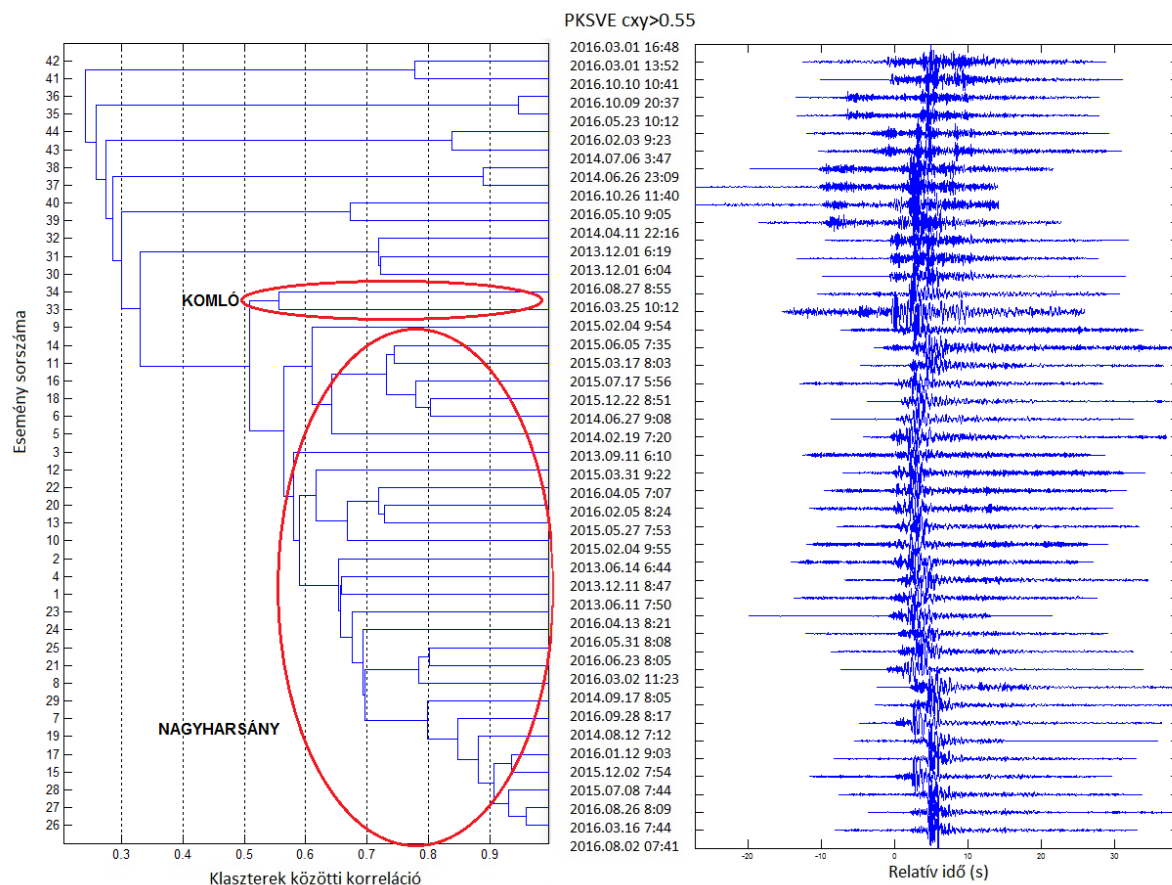
A 2015 és 2016 közötti időszak szeizmikus eseményeinek elemzése MsC diplomamunka keretében történt (Kalocsai Lilla 2017) és e dolgozat eredményeit terjesztettük ki a 2004-2015 közötti időszakra. A diplomamunka készítése kapcsán a Pécsi Bányakapitányságtól megkaptuk a terület bányáinak 2015 és 2016 közötti robbantási időpontjait (csak a dátumokat, pontos időpont nélkül). Ezek alapján sikerült a korábban robbantásnak jelölt szeizmikus eseményeket a megfelelő bányákhoz kapcsolni, és 16 korábban tévesen földrengésnek vett robbantást kivenni a természetes események közül. A dolgozat során született másik fontos eredmény, hogy elő tudtuk állítani az egyes bányák robbantásaira jellemző hullámforma adatbázist, aminek felhasználásával a megelőző időszakokban (2004–2015 között) keletkezett események azonosítása is lehetővé vált, és amit a jövőben is fel tudunk használni az elkülönítésre.

A 3. ábrán a PKSV állomás hullámformáira kapott dendrogram látható a szeizmogramokkal, ami a hullámformák hasonlósági – „rokoni” – kapcsolatának egyfajta vizuális megjelenítése. A legnagyobb klasztert a nagyharsányi bányarobbanások alkotják, ami 2013 és 2016 között összesen 30 robbantást tartalmaz (2012-ben kezdte meg működését az állomás). Bár ehhez az állomáshoz a máriagyüdi kőbánya működik a legközelebb ($\approx 0,9$ km), de ennek robbantásait más állomások legtöbbször nem érzékelték, így csak 1 robbantásnak sikerült meghatározni az epicentrumát. Ezért a hullámforma korrelációba nem kerültek bele ezek a szeizmikus események.

A 4. és 5. ábrán a Komló andezit kőbánya robbantásainak KOVH és PKSM állomás felvételeiből készült klaszterei láthatók. Ez a bánya 7,9 km-re található a KOVH és 37 km-re a PKSM állomásoktól. Ezért a hullámformák a két állomáson eltérőek. Jellemző azonban a robbantások időpontja (7 és 10 óra között), valamint az alacsonyabb frekvencia tartalom, azaz a talaj hosszú periódusú hullámozása az esemény végén (coda). Ez a sekélyfészű szeizmikus eseményekre jellemző R_g fázis, ami a mélyebb fészű földrengések szeizmogramjaiból hiányzik.

A három állomás hullámformáinak vizsgálata kiegészítette egymást, mivel voltak olyan robbantások, amik csak az egyik állomás klaszterébe kerültek bele. Több állomás elemzése több időt vesz igénybe, de az eredmény is teljesebb.

A robbantások rendszeres észlelése csak 2012-től kezdődött el, mivel ekkor indult el a PKSV állomás működése, javult a terület lefedettsége és már a kisebb méretű bányarobbanások is katalógusba kerülhettek.



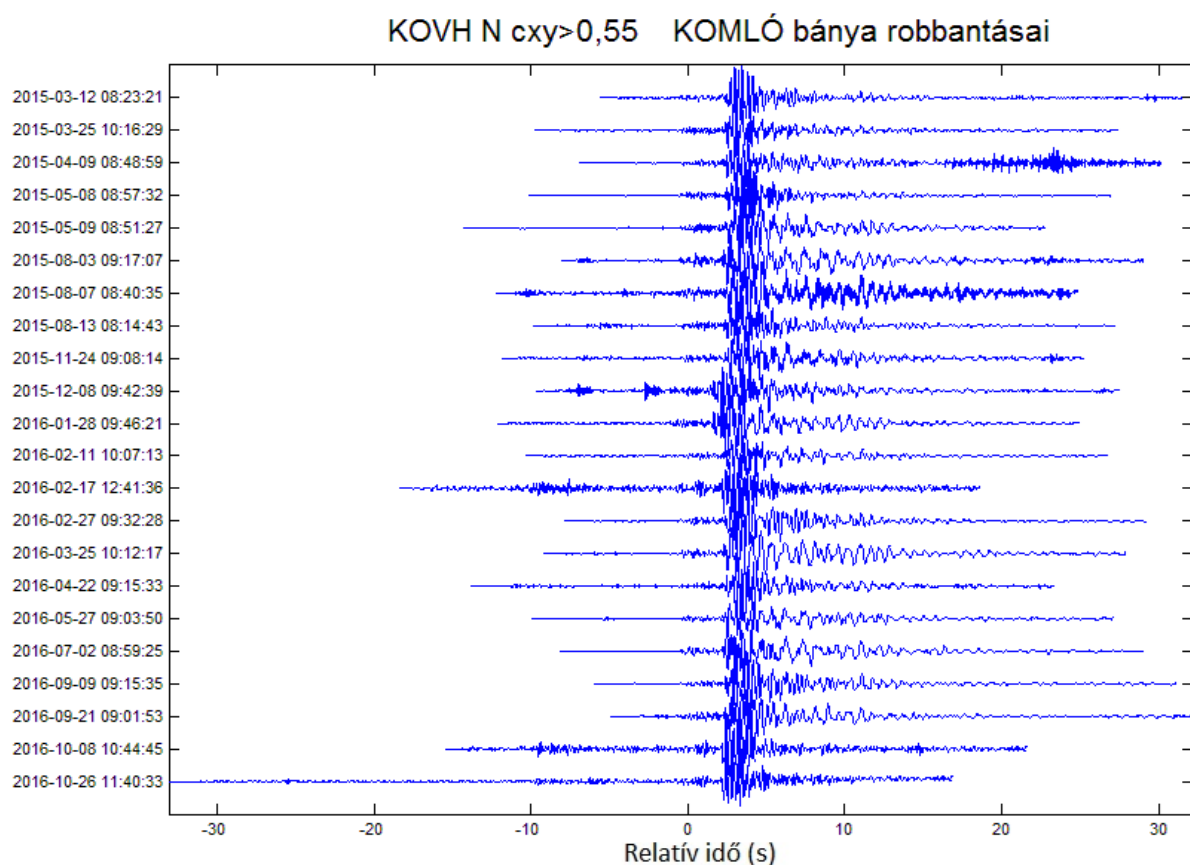
3. ábra. A PKSV állomás szeizmogramjainak hullámforma-korreláció elemzése (dendrogram és szeizmogramok)

Figure 3. The results of waveform correlation analysis (dendrogram and seismograms) in case of PKSV station

A KOVH esetében (4. ábra.) látható, hogy 2015 és 2016 közötti évekből is a klaszterbe kerültek robbantások. Ezért akár évekre visszamenőleg is ki tudjuk szűrni a hullámformák hasonlósága segítségével a tévesen azonosított földrengéseket a bányarobbantások időpontjának visszaigazolása nélkül. Jellemző még a robbantásokra, hogy méretük $M_L=0,2-2,1$, a földrengéseké pedig $M_L=-0,1-3,9$ között változott.

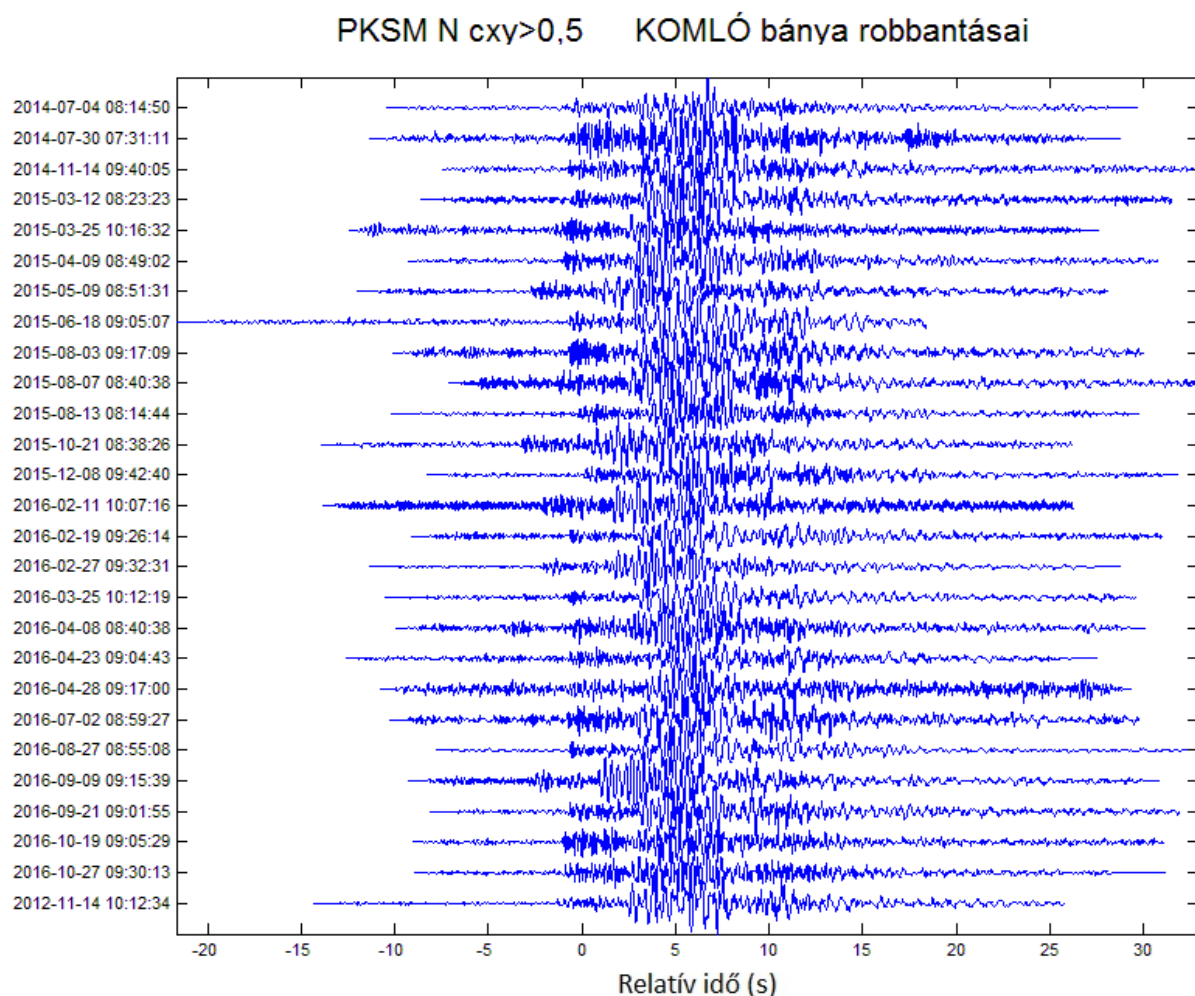
Általános tapasztalat, hogy a természetes eredetű rengéseket követő utórengések is rajokat, „klasztereket” alkotnak, és az abban levő rengések hullámformái egymáshoz nagyon hasonlóak (Massa et al. 2006; Aster & Scott 1993). A Mecsek környéki földrengések esetében is kaptunk két nagyobb (6 és 7 elemű) és több kisebb klasztert (6. ábra), valamint 2 elemű dubletteket.

A robbantásokat egy jellegzetes szónikus eredetű hullámcsomag (hanghullám által keltett talajmozgás) is kísérheti, aminek regisztrálását más bányák robbantásainál is leírták (Gitterman et al., 2008; Rogers & Koper, 2011). Előfordult, hogy amplitúdójuk elérte a P-hullámét, vagy akár többszörösen meg is haladta. Ezt a hangsebességgel terjedő szónikus hullámcsomagot figyeltük meg több nagyharsányi bányarobbantás esetében is a PKSV állomás vertikális csatornájának szeizmogramjain (7. ábra). Az állomás kb. 12 km-re helyezkedik el a bányától, ennek megfelelően 32-34 másodperces késéssel látható a szónikus jel. Az 1-2 s-os eltérés időjárási elemekkel és a bánya kiterjedésével magyarázható. 2017-ben indult el Pizskéstetőn az első magyar infrahangállomás az MTA GGI gondozásában, aminek egyik várható eredménye lesz, hogy a bányarobbantásokat követő szónikus jelet nagy érzékenységgel regisztrálja, és segít elkülöníteni ezeket a természetes eredetű földrengésektől.



4. ábra. A KOVH állomás É-D horizontális csatornáin a $c_{xy}>0,55$ feltétellel a hasonló komlói bányarobbantások hullámformái

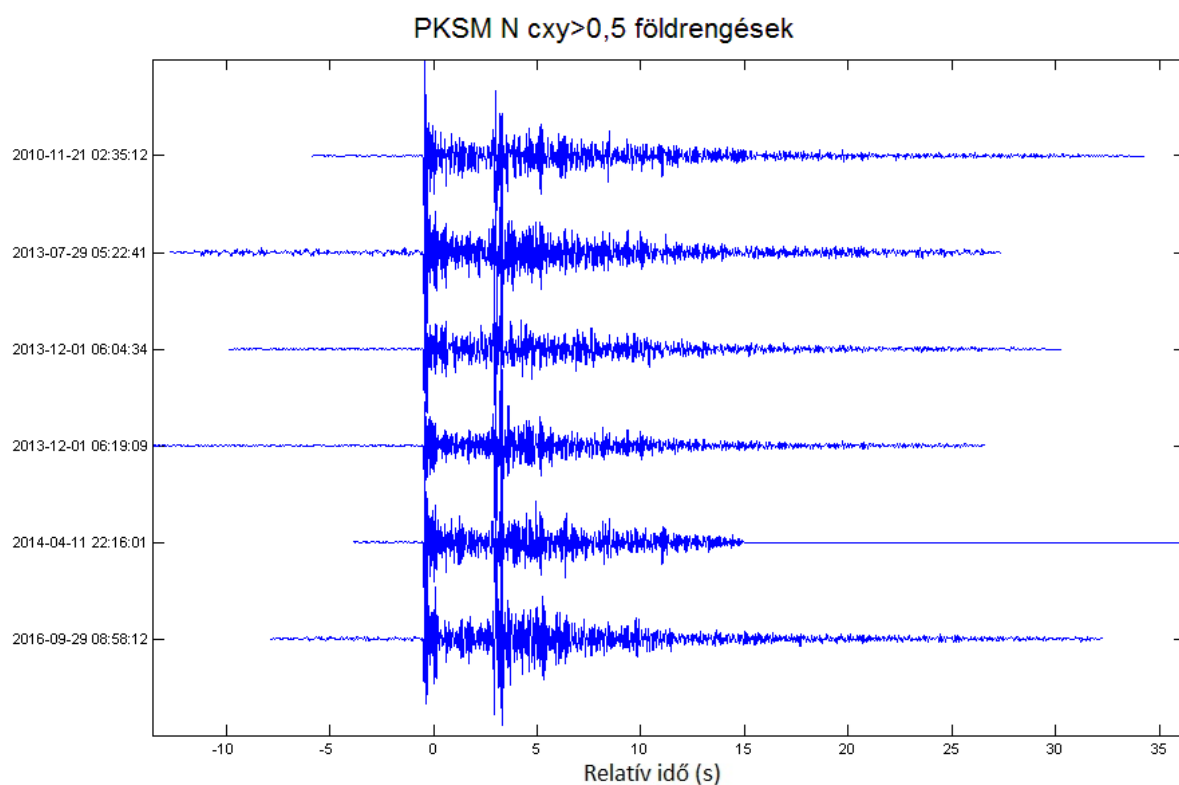
Figure 4. The similar waveforms ($c_{xy}>0,55$) originated from Komló quarry on KOVH N-S horizontal channels



5. ábra. A komlói bányarobbantások hasonló ($c_{xy}>0,5$) hullámformái a PKSM állomás É-D horizontális csatornákon

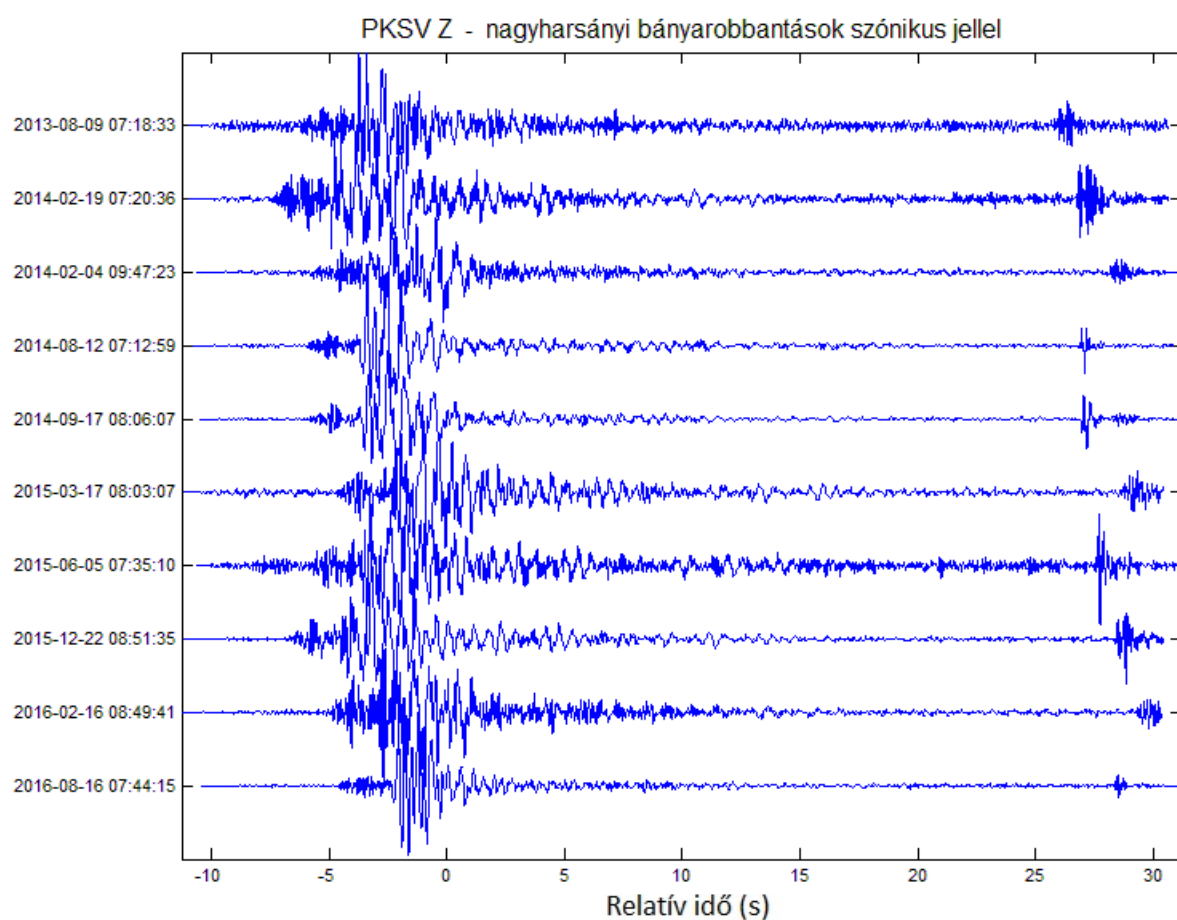
Figure 5. The similar waveforms ($c_{xy}>0,5$) originated from Komló quarry on PKSM N-S horizontal channels

Sajnos nem minden robbantás került bele valamelyik klaszterbe, és a spektrumelemzésre a zajosabb felvételek nem voltak használhatóak. Ezért az elemzést elvégeztük a spektrumjellemzők felhasználásával is.



6. ábra. Földrengések hasonló ($c_{xy}>0,5$) hullámformái a PKSM állomás É-D horizontális csatornáin

Figure 6. Similar waveforms ($c_{xy}>0,5$) originated from earthquakes on PKSM N-S horizontal channels

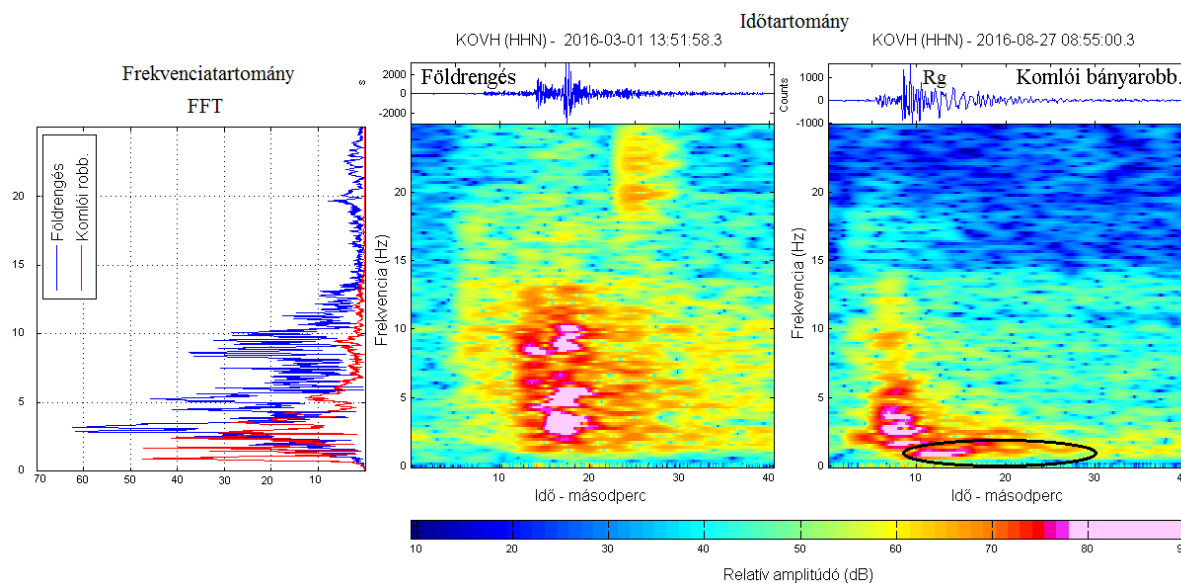


7. ábra. A PKSV állomás vertikális csatornáján néhány nagyharsányi bányarobbanás szeizmogramja a szónikus (hangsebességgel terjedő) hullámcsomaggal
 Figure 7. Some seismograms originated from Nagyharsány quarry and registered on PKSV station vertical channel with the sonic wavepacket

A spektrumok elemzése

A spektrumok elemzésével a késleltetett robbantási technika ujjenyomatát kerestük azokon az eseményeken, amik nem kerültek be a bányák klasztereibe. A vizsgált területen a bányák környezetében még nagyon sok földrengést tartalmaznak a katalógusok, ezek spektrumait elemeztük a továbbiakban.

A legtöbb robbantás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő csipkézettség. A teljesítményspektrum az 1-5 Hz közötti sávban jelentősen megnőtt, és a csipkézettség is az 1-5 Hz közötti spektrumtartományra volt leginkább jellemző. Az egyes frekvenciák teljesítményének megemelkedése a nagyobb frekvenciák felé haladva újra jelentkezett, de egyre kisebb amplitúdóval (8. ábra). Néhány földrengés esetén is mutatkozott egyes frekvenciák megemelkedett teljesítménye, de a spektrum magasabb frekvenciákig terjedt ki, mint a robbantások esetében. A magasabb frekvenciák felé haladva gyorsabban csökkent a robbantások teljesítményspektruma, mint a földrengéseké. A robbantásokra jellemző alacsony frekvencia tartalmú Rg fázis is megfigyelhető a 8. ábrán.



8. ábra. A KOVH állomás horizontális csatornáján egy földrengés és egy komlói bányarobbanás szeizmogramjai idő-frekvencia tartományban
 Figure 8. The horizontal components of the KOVH seismograms in time-frequency domain in case of an earthquake and a quarry blast of quarry Komlói

Az egymáshoz közeli forrásból származó földrengések spektrumaira is jellemző a nagyfokú hasonlóság, ezért a bányák közelébe meghatározott eseményeknél – ha azok hullámformái nem kerültek egyetlen bányához tarozó klaszterbe sem – a spektrumelemzés segít eredetük eldöntésére.

Eredmények

A hullámforma és spektrumelemzésben részt vett szeizmikus események számát foglaltuk össze a 3. táblázatban. A jelentősen eltérő számokat az indokolja, hogy az egyes állomások különböző időpontban léptek működésbe.

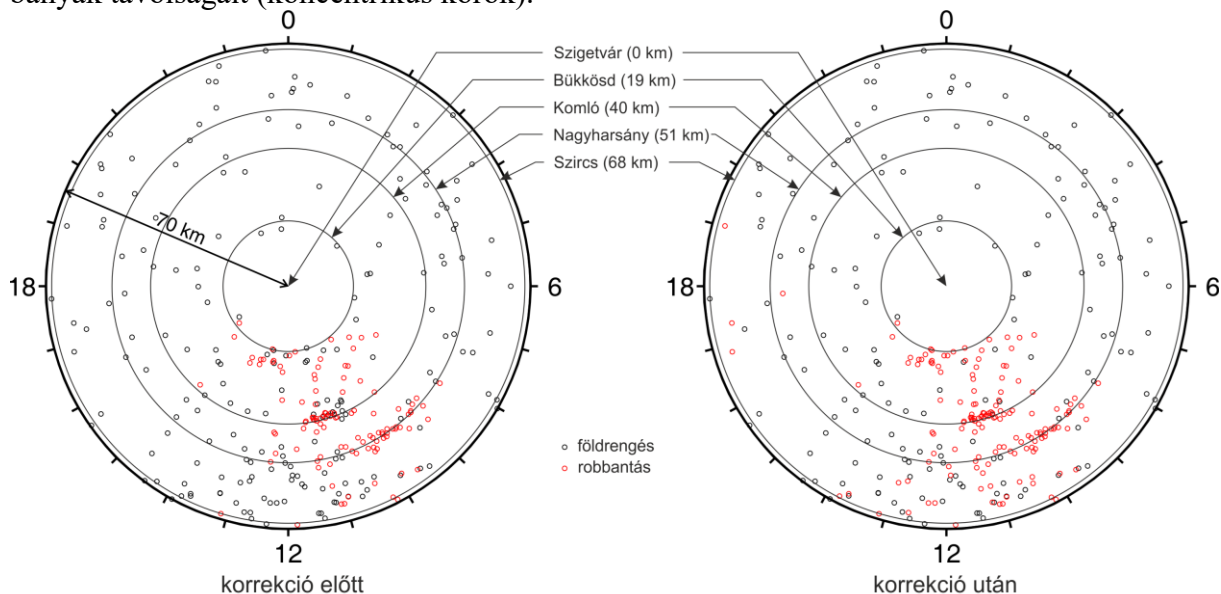
3. táblázat. A különböző elemzésekben részt vett események száma
Table 3. The number of events used in the different pluralis

Állomás kódja	Használható szeizmogram száma	Hasonló hullámformák száma	spektrumokhoz felhasznált hullámformák
KOVH	108	53 (49%)	80
PKSM	254	109 (45%)	236
PKSV	100	45 (45%)	72

Az osztályozás helyességének ellenőrzése érdekében elkészítettük a terület szeizmikus eseményeinek idő-távolság diagramját a korrekció elvégzése előtt és után (9. ábra). Az idő-távolság diagramon az egyes események helyét a kipattanási idő (helyi idő) és az epicentrumnak egy adott referenciaponttól mért távolsága adja meg. A kör alakú diagramon a középponttól mért távolság felel meg a választott referencia ponttól mért epicentrális távolságnak, a függőleges iránnyal bezárt szög pedig a kipattanási időnek (24 órás beosztás).

A földrengés-katalógusokban az események keletkezési időpontját mindig világidőben (UTC) adják meg. Ezen vizsgálatnál azonban nem célszerű a világidő használata, mivel a bányaművelés során végrehajtott robbantások időpontját a napi munkarend szabja meg, vagyis a vizsgálatnál a helyi időt kell figyelembe venni. Esetünkben a helyi idő télen egy órával, a nyári időszámítás folyamán pedig két órával jár a világidő előtt. Ezt az időkorrekciót a diagram készítése előtt elvégeztük.

A diagram elkészítéséhez referencia pontként Szigetvár koordinátáit választottuk, egyrészt mivel ez közel van a vizsgált terület középpontjához, másrészt pedig a területre eső bányáktól különböző távolságra esik, így a diagramon az egyes bányák eseményei várhatóan elkülönülnek. A diagram könnyebb értelmezése érdekében a diagramon feltüntettük az egyes bányák távolságait (koncentrikus körök).



9. ábra. A terület szeizmikus eseményeinek eloszlása a helyi idő és távolság szerint az osztályozás korrekciójának elvégzése előtt és után

Figure 9. Distance-time diagram of the seismic events before and after the correction of classification

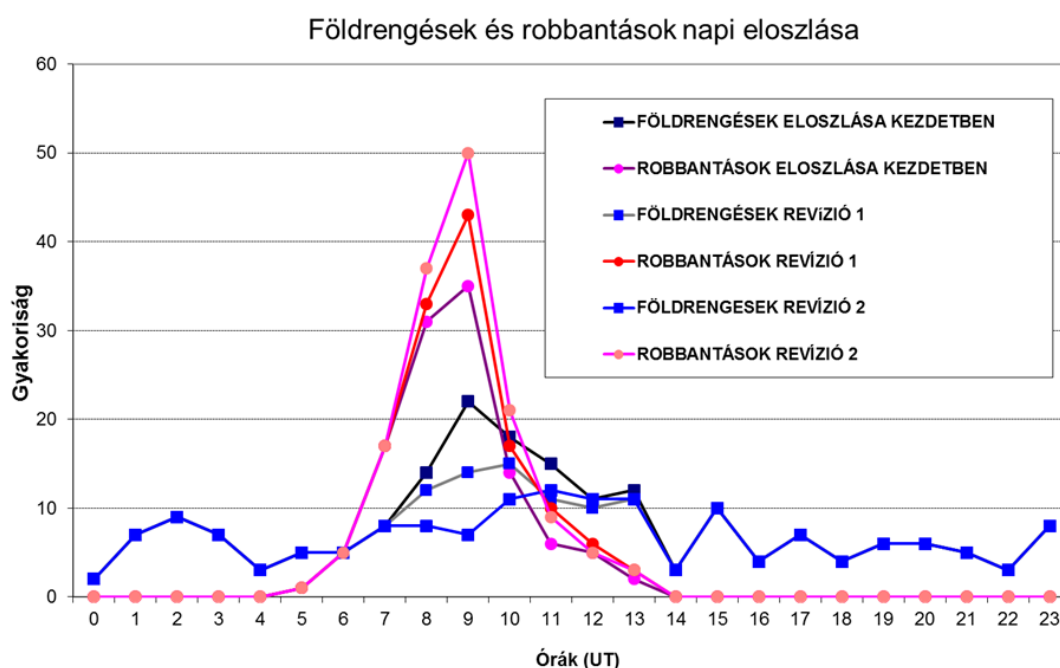
A diagramon a korrekciót megelőző állapotot vizsgálva megállapítható, hogy az események kategorizálásában durva hiba nem fedezhető fel (pl. nincsenek éjszakai robbantások), de a munkaórák időszakában feltűnő a földrengésnek minősített események dúsulása. Vagyis joggal feltételezhető, hogy ezeknek egy része valójában bányarobbanás volt.

A hullámformák és a spektrumok elemzése után ismét elkészítettük a rengések és robbantások napi eloszlását bemutató diagramot (4. Táblázat, 10. ábra). A nappali 7-10 óra közötti maximum a földrengések esetében fokozatosan csökkent.

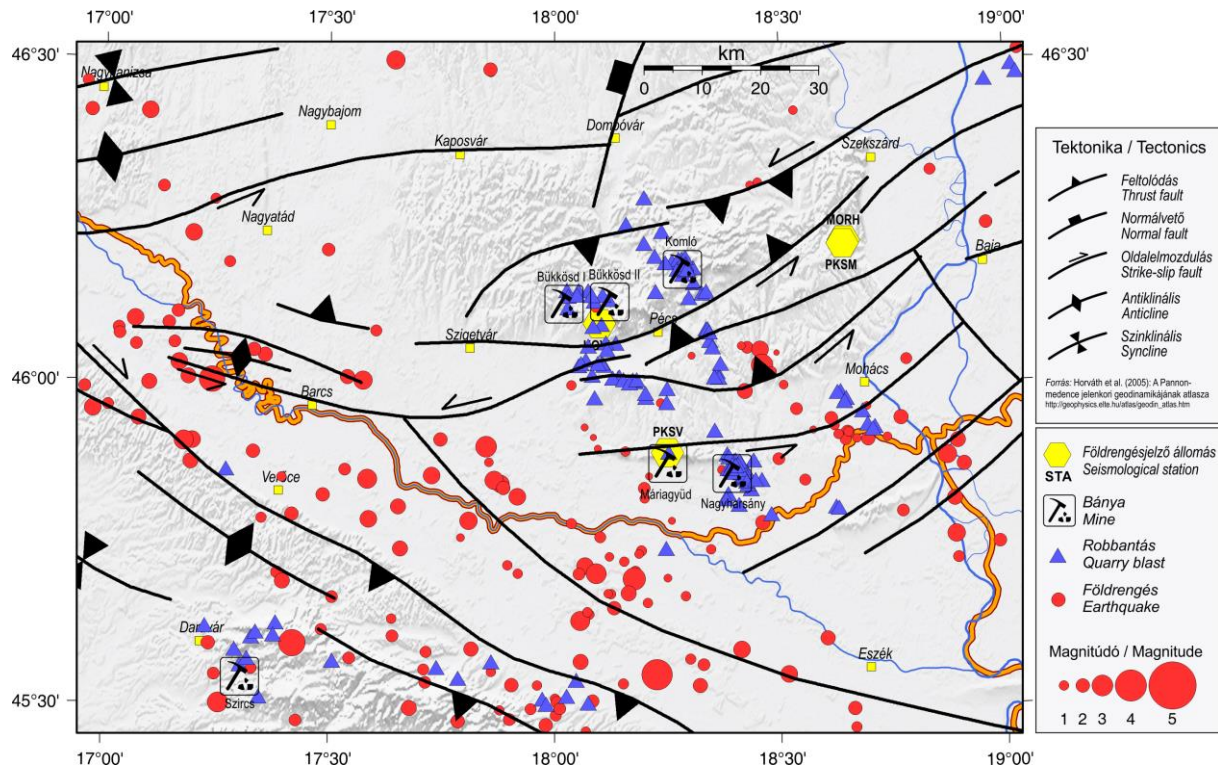
4. táblázat. A földrengések és robbantások számának a változása
Table 4. The variation of number of earthquakes and quarry blasts

Lépések	Rengés	Robbantás
Kiindulás	194 (63%)	116 (37%)
Első lépés (hullámformák hasonlósága)	175 (56%)	135 (44%)
Második lépés (+ spektrumelemzés)	153 (49%)	157 (51%)

A 11. ábra a katalógus felülvizsgálata utáni szeizmicitás-térképet mutatja a neotektonikus (aktív) szerkezeti elemekkel (Horváth et al. 2005). Több $M < 2$ rengés látható még a magyarországi bányák környezetében, és legalább egy horvátországi bánya robbantásait (vagy azok zömét) sikerült kiszűrni. Hasznos lenne a határon túli bányák robbantásairól is listához jutni. Bár Magyarország szeizmicitását szórtnak szoktuk minősíteni, a határ mentén ill. attól délre jelölt neotektonikus aktív szerkezeteket a 2004-2016 közötti időszak mikrorengései is kijelölik, ugyanez azonban hiányzik a Mecsektől északra húzódó, jelölt szerkezetek esetében.



10. ábra. A földrengések és robbantások napi eloszlásának alakulása a hullámforma hasonlóság (Revízió 1) és spektrumelemzés (Revízió 2) után
 Figure 10. The modification of diurnal distributions of earthquakes and quarry blasts after the waveform similarity (Revision 1) and spectral analyses (Revision 2)



11. ábra. A terület szeizmikus eseményei a hullámformák és spektrumok elemzését követő javított osztályozás szerint a neotektonikus (aktív) szerkezetekkel (Horváth et al. 2005)
 Figure 11. Seismic events of the region after the waveform correlation and spectral analysis based classification and the neotectonic (active) structures (Horváth et al. 2005)

Összefoglalás

Megvizsgáltuk a Mecsek-hegység környezetében 2004 és 2016 között meghatározott 310 szeizmikus eseményt, aminek eredetileg a 63%-át minősítették földrengésnek (194 földrengés, 116 robbantás). Azonban a természetes eredetűnek minősített rengések napi eloszlása egy délelőtti maximumot mutatott, ami a hibás osztályozásra utalt.

A Pécsi Bányakapitányság közreműködésével megkaptuk a 2015 és 2016 közötti robbantási időpontokat. Ennek segítségével sikerült a vizsgált területen 5 bányát azonosítani, amelyek robbantásai rendszeresen belekerültek a katalógusokba.

Tapasztalataink szerint a robbantások hullámformái éveken át nagyon hasonlóak maradnak, erre alapozva hullámforma korrelációs vizsgálattal tanulmányoztuk a 2004 utáni eseményeket, és 19 tévesen földrengésnek vett robbantást szűrtünk ki. A PKSM, PKSV és KOVH állomásokon regisztrált különböző bányákból származó robbantások szeizmogramjai segítségével előállítottunk egy-egy tipikus hullámforma gyűjteményt a bányákhoz, amiknek segítségével a jövőbeli robbantások kiszűrése egyre sikeresebb lesz.

A késleltetett robbantási technikának a spektrumokon megjelenő bélyege alapján további 13 eseményt kellett átcsoportosítani. Az elemzés után 52%-ra csökkent a földrengések aránya.

Több állomás adatait használva, és a hullámforma és spektrumelemzéseket együtt alkalmazva egyre több robbantást sikerült kiszűrni. Vizsgálataink szerint a 2004 és 2016 közötti katalógusok összes eseményének 10%-a (32 esemény) volt tévesen földrengésnek jelölt robbantás (162 földrengés, 148 robbantás).

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni a GeoRisk Földrengés Mérnöki Irodának, hogy a PKSM és PKSV állomások hullámformáit a korrelációs vizsgálatokban felhasználhattuk.

Hivatkozások

- Aster R C, Scott J (1993):** Comprehensive characterization of waveform similarity in microearthquakes data set, BSSA, 83, 1307-1314 pp.
- Bohus (2013):** Robbantástechnika, A Magyar Robbantástechnikai Egyesület tájékoztatója, 2013, 33. szám
- Gitterman Y, & Torild Van Eck (1993):** High-frequencies of regional phases from earthquakes and chemical explosions. BSSA, V. 83, No. 4, 1799-1812.
- Gitterman Y, Pinsky V, Shapira A (1998):** Spectral classification methods in monitoring small events by the Israel seismic network. Journal of Seismology, V. 2, 237-256
- Gitterman Y, Pinski V, Shapira A (1998)** Spectral classification methods in monitoring small local events by the Israel seismic network, Journal of Seismology, September 1998, Volume 2, Issue 3, pp 237-256
- Gráczer Z, Czifra T, Kiszely M, Mónus P, Zsíros T (2012):** Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2011, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, MTA CSFK GGI, Budapest, 357.
- Gráczer Z (szerk), Czanik Cs, Czifra T, Győri E, Kiszely M, Mónus P, Süle B, Szanyi Gy, Tóth L, Varga P, Weszttergom V, Wéber Z, Zsíros T (2013):** Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2012, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, MTA CSFK GGI, Budapest, 260.
- Gráczer Z (szerk), Czanik Cs, Czifra T, Győri E, Kiszely M, Mónus P, Süle B, Szanyi Gy, Tóth L, Varga P, Weszttergom V, Wéber Z, Zsíros T (2014)** Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2013, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, MTA CSFK GGI Budapest, 466.
- Gráczer Z (szerk), Bondár I, Czanik Cs, Czifra T, Győri E, Kiszely M, Mónus P, Süle B, Szanyi Gy, Tóth L, Varga P, Weszttergom V, Wéber Z, Zsíros T (2015):** Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2014, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, MTA CSFK GGI Budapest, 563.
- Gulia L (2010):** Detection of quarry and mine blasts contamination in European regional catalogue. Nat. Hazards, V. 53, 229-249. DOI 10.1007/s11069-009-9426-8.
- Horváth F, Bada G, Windhoffer G, Csontos L, Dövényi P, Fodor L, Grenerczy Gy, Síkhegyi F, Szafián P, Székely B, Timár G, Tóth L, Tóth T (2005):** A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza: Euro-konform térképsorozat és magyarázó. OTKA T034928 sz. projekt, zárójelentés. ELTE FFI Geofizikai Tsz., Budapest, 38 o. (<http://geophysics.elte.hu/atlas/10.htm>)

- Kalocsai L** (2017): A földrengések és robbantások elemzése a KOVH és MORH szeizmológiai állomások adatainak felhasználásával (MSC szakdolgozat ELTE)
- Kekovali K, Kalafat D, Deniz P** (2012): Spectral discrimination between mining blasts and natural earthquakes: Application to vicinity of Tunbilek mining area, western Turkey. *International Journal of Physical Sciences*, V. 7(35), 5339-5352.
- Kim S G, Simpson D W, Richard P G** (1994): High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions. *BSSA*, V. 84, 1365-1386.
- Kiszely M, & Győri E** (2013): Az Észak-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant földrengések és robbantások összehasonlító elemzése, *Magyar Geofizika*, 54 (4), 185-203.
- Kiszely M, Mónus P, Tóth L, Győri E** (2016): Érsekivádker, Iliny és Heves területén 2013 és 2015 között kipattant földrengések klaszter elemzése. *Magyar Geofizika*, 57 (1). pp. 45-46. ISSN 0025-0120
- Koch K, & Fäh D** (2002): Identification of earthquakes and explosions using amplitude ratios: The Voghtland area revisited. *Pure appl. Geophys.*, V. 159, 735-757.
- Massa M, Eva E, Spallarossa D, Eva C** (2006): Detection of earthquake clusters on the basis of waveform similarity: An application in the Monferrato region (Piedmont, Italy). *Journal of Seismology*, no. 10. 1-22.
- Rogers J D, Koper K D** (2011): Some Practical Applications of Forensic Seismology (PDF letöltve: 2016.06.25)
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2005) Magyarországi földrengések évkönyve - 2004, *GeoRisk - MTA GGKI*, Budapest, 94 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2006) Magyarországi földrengések évkönyve - 2005, *GeoRisk - MTA GGKI*, Budapest, 80 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2007) Magyarországi földrengések évkönyve - 2006, *GeoRisk - MTA GGKI*, Budapest, 80 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2008) Magyarországi földrengések évkönyve - 2007, *GeoRisk - MTA GGKI*, Budapest, 76 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2009) Magyarországi földrengések évkönyve - 2008, *GeoRisk - MTA GGKI*, Budapest, 98 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2010) Magyarországi földrengések évkönyve - 2009, *GeoRisk - MTA GGKI*, Budapest, 92 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2011) Magyarországi földrengések évkönyve - 2010, *GeoRisk - MTA GGKI*, Budapest, 140 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2012): Magyarországi Földrengések Évkönyve - 2011, *GeoRisk*, Budapest, 158 o.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2013): Magyarországi Földrengések Évkönyve - 2012, *GeoRisk*, Budapest, 88 o.
- Tóth L, Mónus P, Kiszely M** (2014): Magyarországi Földrengések Évkönyve - 2013, *GeoRisk*, Budapest, 136 o.
- Tóth L, Mónus P, Kiszely M** (2015): Magyarországi Földrengések Évkönyve - 2014, *GeoRisk*, Budapest, 140 o.

- Tóth L, Mónus P, Kiszely M** (2016): Magyarországi Földrengések Évkönyve - 2015, GeoRisk, Budapest, 132 o.
- Tóth L, Mónus P, Kiszely M** (2017): Magyarországi Földrengések Évkönyve - 2016, GeoRisk, Budapest, 126 o.
- Wiemer S, & Baer M** (2000): Mapping and removing quarry blasts events from seismicity catalogs. BSSA, V. 90, No. 2, 525-530.
- Wüster J** (1993): Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europe a case study. BSSA, V. 83, No. 4, 1182-1212.
- Yilmaz S, Bayrak Y, Cinar H** (2013): Discrimination of earthquakes and quarry blasts in the eastern Black Sea region of Turkey, J Seismology 17(2), 721-734